

Магнітна і електрична сепарація

УДК 662.772/.778

А.М. ТУРКЕНИЧ, д-р техн. наук,
К.А. ЛЕВЧЕНКО, В.В. ДЕМЕНТЬЕВ, кандидаты техн. наук,
Л.А. ШАТОВА

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

А.Б. РТИЩЕВ, канд. техн. наук
(Украина, Кривой Рог, Центральный горно-обогатительный комбинат)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫДЕЛЕНИЮ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО КОНЦЕНТРАТА МЕТОДОМ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИЕЙ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МАГНЕТИТОВЫХ РУД ЦГОКА

Центральный горно-обогатительный комбинат (ЦГОК) обогащает относительно легкообогатимые магнетитовые кварциты Кривбасса. Содержание железа в его концентратах составляет 67,0...68,0%. Для расширения рынка сбыта своей продукции одной из задач комбината является поиск возможных путей повышения содержания железа в концентрате до 69,0...70,0%, что позволит повысить его металлургическую ценность и использовать в порошковой металлургии и производстве металлизированных окатышей.

Один из путей повышения качества концентрата – применение метода высокоградиентной магнитной сепарации в слабом поле (ВГМССП). Проведенные в НГУ исследования по обогащению концентрата Ингулецкого горно-обогатительного комбината показали, что с помощью данного метода можно получить часть концентрата с содержанием железа на 2,0...3,0% выше [1].

Известно, что в высокоградиентных магнитных сепараторах со слабым полем, матрица которых состоит из рифленных пластин, средняя напряженность магнитного поля в зазорах распределяется неравномерно по ширине матрицы [2]. Диапазон напряженности магнитного поля, необходимый для различных типов руд, разный. Установлено, что для концентрата ЦГОКа максимальное среднее значение напряженности магнитного поля не должно превышать на основном приеме 27 кА/м, на перечистном – 24. Минимально возможным является значение 12 кА/м, так как дальнейшее снижение напряженности приводит к резкому падению выхода магнитного продукта при практически одинаковом содержании железа в нем.

При расположении матрицы между блоками магнитов и замыкающим магнитопроводом количество рабочих зазоров на основном приеме – 12, на перечистном – 10. Графики распределения напряженности магнитного поля в рабочих зазорах по ярусам сепаратора приведены на рис. 1.

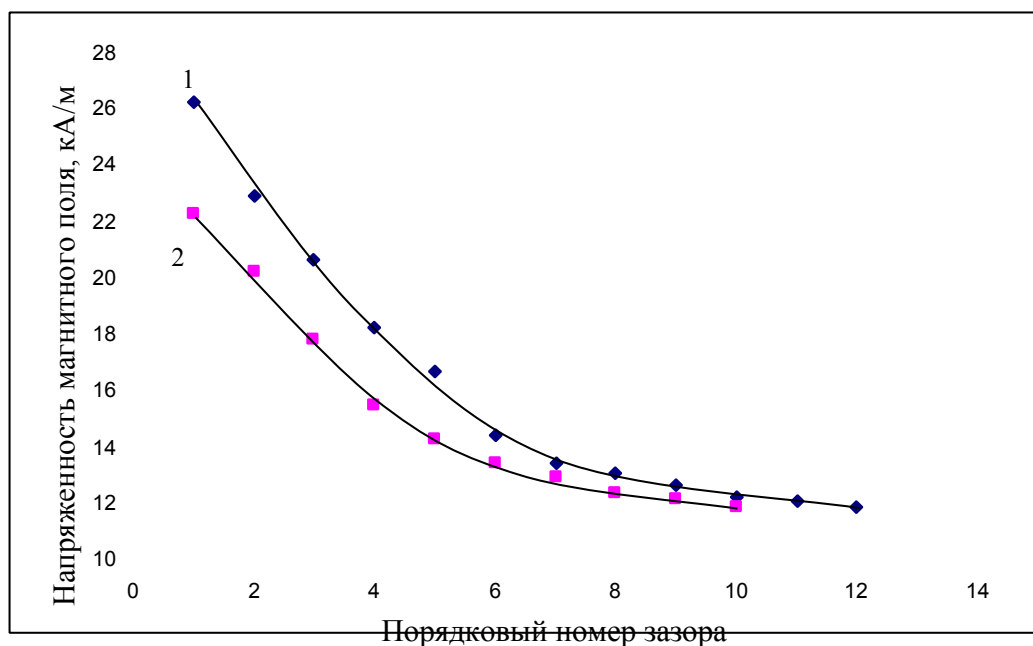


Рис. 1. Распределение напряженности магнитного поля в рабочих зазорах
высокоградиентного сепаратора со слабым полем:
1 – основной прием сепарации; 2 – перечистной прием сепарации

Высокоградиентная магнитная сепарация текущего концентрата ЦГОКа проводилась в два приема с перечисткой магнитного продукта при следующих условиях: содержание твердого в питании – 20%, ширина зазора между рифленными пластинами – 5 мм, шаг рифлений пластин – 5 мм, расход воды на промывку магнитных продуктов – 4 мл/г. Качественно-количественные показатели обогащения приведены в таблице, из которой видно, что 48,2% концентрата выделено с необходимым содержанием железа (69,7%). Для повышения содержания железа в магнитных продуктах выполнялась их промывка, поэтому содержание твердого в немагнитном продукте составило 3...5%.

Продукты разделения	Показатели обогащения, %		
	Выход	Содержание железа	Извлечение
Концентрат	48,2	69,7	49,6
Немагнитный 1	18,9	63,8	17,7
Немагнитный 2	32,9	67,5	32,7
Общий немагнитный (1+2)	51,8	66,0	50,4

Исходный		100,0		67,8		100,0
----------	--	-------	--	------	--	-------

Для повышения содержания железа и удаления избыточной воды была выполнена перемелка общего немагнитного продукта (66,0% Fe) при максимальном среднем значении напряженности магнитного поля 36 кА/м. Общая схема ВГМССП приведена на рис. 2.

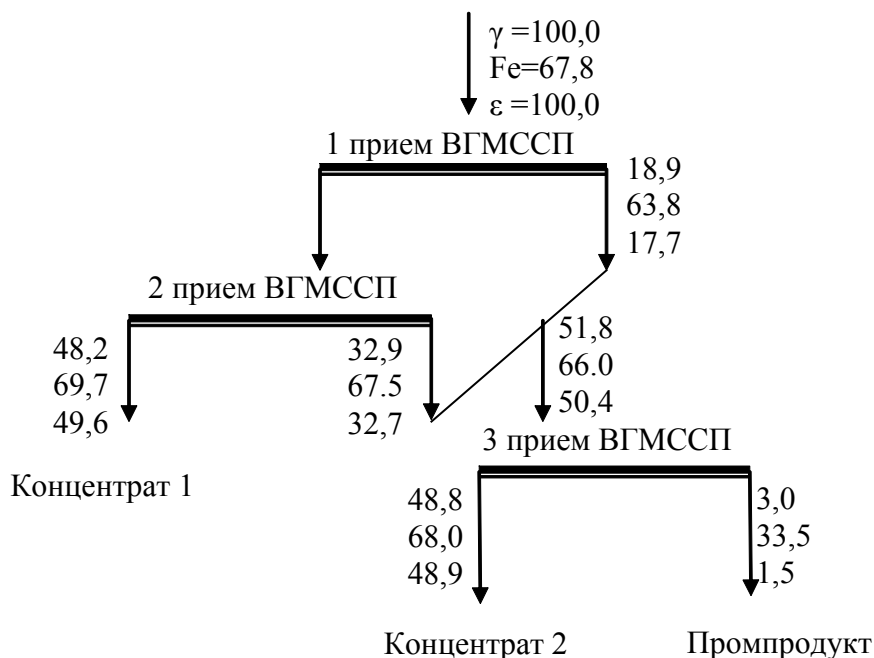


Рис. 2. Общая схема ВГМССП текущего концентрата ЦГОКа

Таким образом, применение метода ВГМССП для обогащения текущего концентрата ЦГОКа позволяет получить 48,2% высококачественного концентрата (69,7% Fe) и 48,8% концентрата с содержанием железа 68,0%, соответствующего по качеству концентрату, получаемому по существующей схеме. Выход немагнитного продукта после третьего приема сепарации составил 3,0% с содержанием железа 33,5%. Весь процесс ВГМССП возможно осуществить на одной машине, имеющей три яруса (рис. 3).

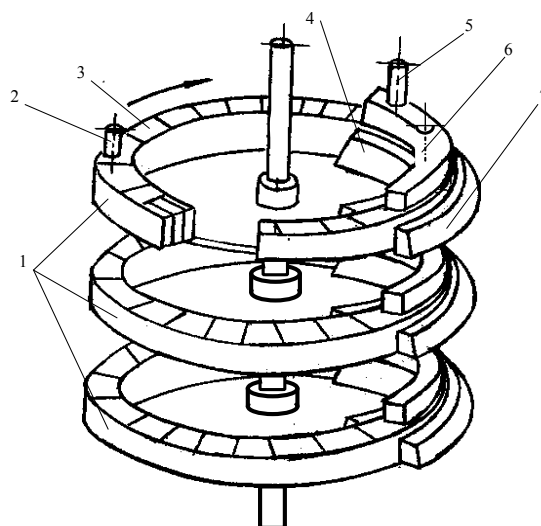


Рис. 3. Принципиальная схема высокоградиентного роторного сепаратора для сильномагнитных руд:

1 – яруса сепаратора; 2 – устройство для смыва магнитного продукта; 3 – матрицы;
4 – магнитная система; 5 – питание сепаратора; 6 – устройство для промывки магнитного продукта; 7 – замыкающий магнитопровод

Питанием первого яруса является текущий концентрат ЦГОКа, второго – магнитный продукт первого яруса, третьего – объединенные немагнитные продукты первого и второго яруса.

Список литературы

1. Высокоградиентная сепарация магнетитовых концентратов в слабых магнитных полях в схеме магнитфлотационного обогащения / **А.М. Туркенич, В.В. Дементьев, К.А. Левченко и др.** // Матеріали міжнар. конф. "Форум гірників". – Д., 2005. – Т. 4. – С. 134–136.
2. Определение количеств рабочих зазоров высокоградиентного магнитного сепаратора со слабым полем при обогащении магнетитовых руд / **А.М. Туркенич, В.В. Дементьев, Л.А. Шатова и др.** // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 25(66)–26(67). – С. 72–77.

© Туркенич А.М., Левченко К.А. Дементьев В.В., Шатова Л.А., Ртищев А.Б., 2006

Надійшла до редколегії 15.09.2006 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецький

УДК 622.7

В.И. МУЛЯВКО, Т.А. ОЛЕЙНИК, кандидаты техн. наук,
Н.В. КУШНИРУК
(Украина, Кривой Рог, Криворожский технический университет)

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО СЕПАРАТОРА С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Для определения оптимальных параметров барабанного сепаратора с вращающейся магнитной системой [1]: скорости вращения, напряженности магнитного поля, расстояния установки шиберных заслонок, необходимо вывести уравнения движения частиц в рабочей зоне сепаратора отличающиеся диаметром, магнитной восприимчивостью и различной скоростью движения барабана.

Пусть немагнитная частица, поступающая с питателя на вращающийся барабан, отбрасывается от него в верхней точке, т.е. ее скорость направлена горизонтально, оси абсцисс (рис.1). Пренебрегая силой Ампера, запишем систему уравнений второго закона Ньютона для движения частоты в воздухе

$$\begin{cases} ma_x = -F_{c1} ; \\ ma_y = -mg + F_{c2} , \end{cases} \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; a_x , a_y – проекции ускорения частицы на соответствующие оси координат, м/с²; F_{c1} , F_{c2} – силы сопротивления (вязкости), действующие на движущуюся частицу.

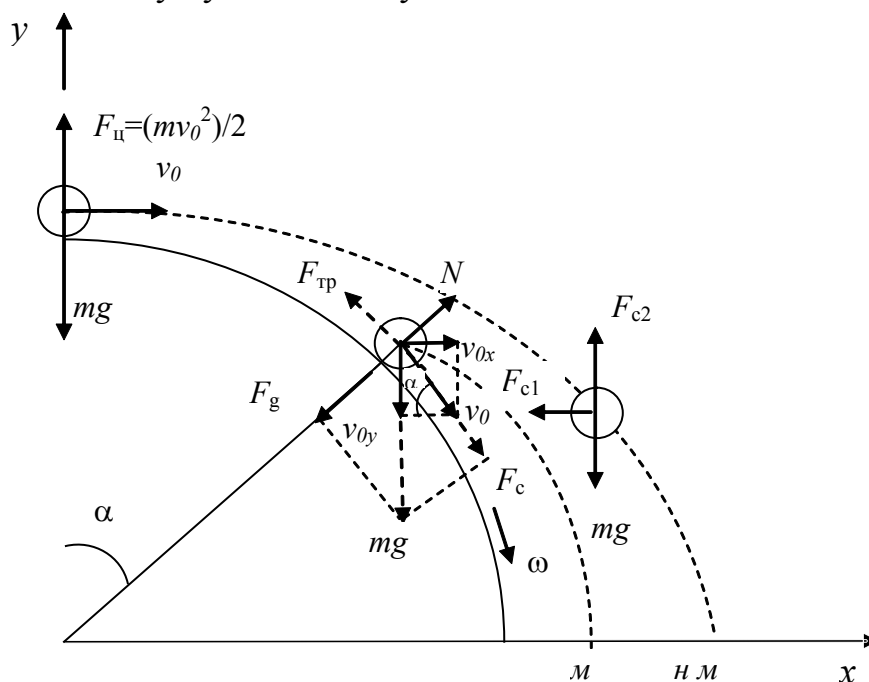


Рис. 1. Силы, действующие на частицы в рабочей зоне сепаратора

Для определения координат частицы в любой момент времени дважды проинтегрируем каждое из уравнений системы (1), считая силу сопротивления, в первом приближении, равной силе Стокса. Преобразуем первое уравнение и разделим в нем переменные, получим

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\frac{F_{cl}}{m} = -\frac{3\pi\eta v_x d_q}{m}; \quad \int_{v_0}^{v_x} \frac{dv_x}{v_x} = -A \int_0^t dt, \quad (2)$$

где $A = \frac{3\pi\eta d_q}{m}$ – постоянная величина; η – динамическая вязкость воздуха ($\eta=18 \cdot 10^{-6}$ Па·с).

После первого интегрирования и подстановки границ интегрирования запишем

$$\ln \frac{v_x}{v_0} = -At, \quad \text{откуда} \quad \ln v_x = -At + \ln v_0. \quad (3)$$

Преобразуем полученное уравнение (3) к удобному для интегрированию виду:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = e^{-At + \ln v_0} = e^{-At} \cdot e^{\ln v_0} = v_0 \cdot e^{-At}. \quad (4)$$

Разделим переменные в (4) и проинтегрируем

$$\int_0^x dx = v_0 \int_0^t e^{-At} dt. \quad (5)$$

В результате получаем одну из координат частицы

$$x = -\frac{v_0}{A} e^{-At} \Big|_0^t = -\frac{v_0}{A} (e^{-At} - 1). \quad (6)$$

Преобразуем второе уравнение системы (2) и разделим в нем переменные

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = -g + Av_y$$

Откуда

$$\int_0^{v_y} \frac{dv_y}{-g + Av_y} = \int_0^t dt \quad (7)$$

После первого интегрирования и подстановки границ интегрирования получаем

$$\frac{1}{A} \left(\ln(-g + Av_y) \right) \Big|_0^{v_y} = t \Big|_0^t, \text{ или } \ln(-g + Av_y) - \ln(-g) = At \quad (8)$$

Преобразуем уравнение (8)

$$\ln \left(\frac{-g + Av_y}{-g} \right) = At, \quad (9)$$

потенцируем его

$$g - Av_y = e^{\ln g + At} = g \cdot e^{At}, \quad (10)$$

разделим переменные и интегрируем

$$\int_R^y dy = \int_0^t (g - g \cdot e^{At}) \cdot \frac{1}{A} \cdot dt,$$

$$y - R = \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} e^{At} \right] \Big|_0^t = \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} e^{At} + \frac{1}{A} \right], \quad (11)$$

учитывая отрицательный знак ускорения g , получаем

$$y = R + \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} e^{At} + \frac{1}{A} \right]. \quad (12)$$

Построим траектории движения немагнитной частицы.

Для этого исключим параметр t из полученной системы уравнений

$$\begin{cases} y = R + \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} (e^{At} - 1) \right]; \\ x = \frac{v_0}{A} (1 - e^{-At}). \end{cases} \quad (13)$$

Из первого уравнения системы получаем

$$e^{At} = \frac{1}{1 - \frac{Ax}{v_0}};$$

$$t = \frac{1}{A} \ln \left(\frac{v_0}{v_0 - xA} \right). \quad (14)$$

Подставим значения (14) во второе уравнение системы (13) и получим уравнение траектории движения немагнитной частицы:

$$y = R + \frac{g}{A^2} \left(\ln \frac{v_0}{v_0 - xA} - \frac{v_0}{v_0 - xA} + 1 \right). \quad (15)$$

Рассмотрим движение магнитной частицы. Угол отрыва ее от барабана найдем из условия равенства центробежной силы инерции сумме магнитной силы, действующей на частицу, и проекции силы тяжести на радиус-вектор частицы:

$$F_y = mg \cdot \cos \alpha + F_m. \quad (16)$$

Откуда

$$\alpha = \arccos \left(\frac{F_y}{mg} - \frac{F_m}{mg} \right). \quad (17)$$

Тогда система уравнений (1) запишется так:

$$\begin{cases} ma_x = -3\pi\eta v_x d \div , \\ ma_y = -mg + 3\pi\eta v_y d \div \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} a_x = \dot{A} v_x , \\ a_y = -g + \dot{A} v_y . \end{cases} \quad (18)$$

Интегрируем первое уравнение

$$\int_{v_{0x}}^{v_x} \frac{dv_x}{v_x} = -A \int_0^t dt ;$$

$$\ln v_x = -At + \ln v_{0x} , \quad (19)$$

где $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$ – проекция начальной скорости на ось абсцисс.

Второй раз интегрируем это уравнение

$$\int_{R \cdot \sin \alpha}^x dx = e^{-At + \ln v_{0x}} \cdot dt ,$$

и получаем

$$x = R \sin \alpha - \frac{v_{0x}}{A} (e^{-At} - 1) = R \sin \alpha + \frac{v_0 \cos \alpha}{A} (1 - e^{-At}) . \quad (20)$$

Интегрируем второе уравнение системы (18)

$$\int_{-v_{0y}}^{v_y} \frac{dv_y}{-g + A v_y} = \int_0^t dt , \quad \frac{1}{A} \ln(-g + A v_y) \Big|_{-v_{0y}}^{v_y} = t , \quad (21)$$

где $v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$ – проекция начальной скорости частицы на ось ординат.

После подстановки границ интегрирования получаем

$$\frac{1}{A} [\ln(-g + A v_y) - \ln(-g - A v_0 \sin \alpha)] = t \quad (22)$$

или

$$\ln(-g + Av_y) = \ln(-g - Av_0 \sin \alpha) + At \quad (23)$$

Потенцируем это выражение

$$-g + Av_y = e^{At + \ln(-g - Av_0 \sin \alpha)} \quad (24)$$

Заменяем v_y на $\frac{dy}{dt}$ и преобразуем к виду, удобному для интегрирования.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{A} [g - (-g + Av_0 \sin \alpha) e^{At}] \quad (25)$$

Разделим переменные и интегрируем

$$\int_{R \cos \alpha}^y dy = \frac{1}{A} \int_0^t [g - (g + Av_0 \sin \alpha) e^{At}] dt \quad (26)$$

После подстановки границ интегрирования запишем

$$y = R \cos \alpha + \frac{1}{A} \left[gt - \frac{1}{A} (g + Av_0 \sin \alpha) e^{At} + \frac{1}{A} (g + Av_0 \sin \alpha) \right];$$

$$y = R \cos \alpha + \frac{1}{A} \left[gt - \frac{1}{A} (g + Av_0 \sin \alpha) (e^{At} - 1) \right] \quad (27)$$

Исключим параметр t из системы уравнений, описывающих траекторию движения магнитной частицы:

$$\begin{cases} x = R \sin \alpha + \frac{v_0 \cos \alpha}{A} (1 - e^{-At}); \\ y = R \cos \alpha + \frac{g}{A} \left[t - \frac{1}{A} \left(1 + \frac{Av_0}{g} \right) \right] (e^{At} - 1). \end{cases} \quad (28)$$

Из первого уравнения получим

$$e^{At} = \frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - (x - R \sin \alpha) \cdot A},$$

а

$$t = \frac{1}{A} \ln \frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - (x - R \sin \alpha) \cdot A}. \quad (29)$$

После подстановки полученных выражений (29) во второе уравнение системы (28) имеем уравнение движения магнитной частицы, покинувшей вращающийся барабан сепаратора

$$y = R \cos \alpha + \frac{g}{A^2} \left[\ln \frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - A(x - R \sin \alpha)} - \left(1 + \frac{A v_0}{g} \sin \alpha \right) \cdot \left(\frac{v_0 \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha - (x - R \sin \alpha) A} - 1 \right) \right]. \quad (30)$$

Виды траекторий движения магнитных и немагнитных частиц для различных значений диаметров частиц и скорости вращения барабана сепаратора, а также для различных магнитных свойств приведены на рис 2.

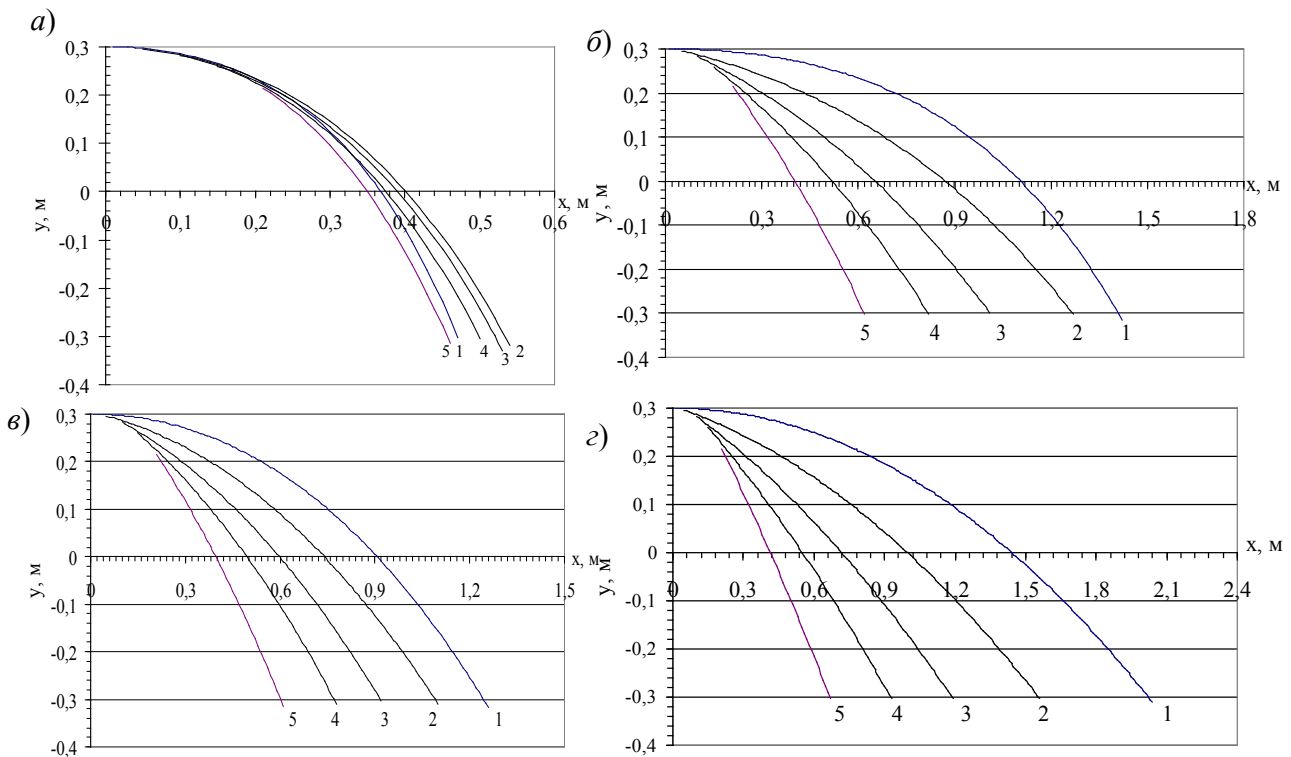


Рис. 2. Траектории движения частицы в рабочей зоне магнитного сепаратора:

- а) – 0,25 мм при скорості вращення барабана 2 м/с;
 - б) – 0,25 мм при скорості вращення барабана 6 м/с;
 - в) – 0,5 мм при скорості вращення барабана 4 м/с;
 - г) – 1 мм при скорості вращення барабана 6 м/с;
- 1 – немагнитные частицы; 2 – магнитные частицы (угол отрыва 10 град);
3 – магнитные частицы (угол отрыва 20 град); 4 – магнитные частицы
(угол отрыва 30 град); 5 – магнитные частицы (угол отрыва 45 град)

Наиболее эффективная для разделения частиц граната и других пороодообразующих минералов скорость вращения барабана сепаратора выбирается на основании сравнения результатов траекторий движения минеральных зерен в рабочей зоне сепаратора и разности координат точек падения между магнитными и немагнитными частицами. Согласно данным рис. 2 для частиц различной крупности оптимальной будет скорость вращения барабана 4...6 м/с. Скорость меньше указанной не позволяет разделить исходный продукт на четыре составляющих, а выделяет из общей массы только сильномагнитную фракцию. Дальнейшее увеличение скорости способствует получению ожидаемых продуктов, но координаты траектории движения частиц достигают значений от 2 до 10 м, что выходит за пределы рабочей зоны сепаратора.

Необходимое расхождение в траектории движения минеральных частиц в рабочей зоне сепаратора, сохраняемое при скорости вращения барабана 4...6 м/с, объясняется достаточной разностью между углами отрыва магнитной и немагнитной фракций. Анализ координат точек падения магнитных и немагнитных частиц показывает, что для частиц крупностью 0,25–0,5 мм шиберные заслонки необходимо устанавливать на расстоянии (l_1) 1 м при скорости движения барабана 6 м/с, для частиц 0,5–1,0 мм – 0,8 м при скорости 4 м/с и для частиц крупностью 1,0–3,0 мм – 1,2 м при скорости 6 м/с. Для выделения продукта, состоящего из раскрытого граната, необходимо установить дополнительную заслонку на расстоянии (l_2) 0,6, 0,54 и 0,64 м для классов крупности 0,25–0,5, 0,5–1,0 и 1,0–3,0 мм соответственно (рис. 3). Поэтому при разработке технологии обогащения гранатосодержащих сланцев руду необходимо расклассифицировать на следующие классы крупности –3+1 мм; –1+0,5 мм; –0,5+0,25 мм и 0,25–0 мм. При этом класс 0,25–0 мм представляет собой отходы, в связи с тем, что он не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сырью по содержанию граната.

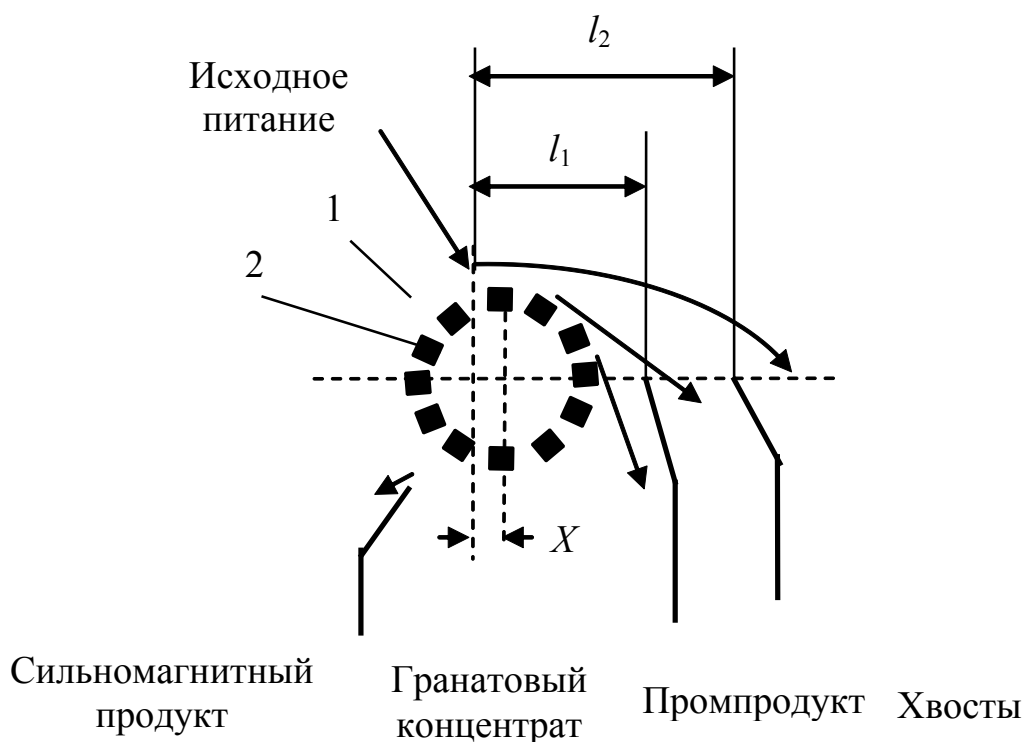


Рис. 3. Схема установки шиберных заслонок в новом сепараторе:

1 – барабан; 2 – магнитная система;

X – эксцентриситет осей вращения барабана и магнитной системы;

l_1 – расстояние от оси барабана до шиберной заслонки, которое отделяет немагнитный продукт; l_2 – расстояние от оси барабана до шиберной заслонки, которое отделяет п продукт

Выполненный сравнительный анализ расчетов координат падения частиц показывает: что кроме скорости вращения барабана на траекторию движения влияет угол отрыва частицы, который зависит от магнитных свойств разделяемых минералов (таблица), что для увеличения скорости эффективного выделения граната из основного потока материала необходимо, чтобы магнитная сила превышала силу тяжести более чем в 4 раза, а это достигается при скорости вращения барабана 4 и 6 м/с и составляет 4,626 и 11,293 раз соответственно. Для скорости вращения барабана 2 м/с это соотношение минимальное – 0,626.

Скорость вращения барабана, м/с	Угол отрыва частицы, град	Отношение F_m/mg
2	10	0,348
	20	0,393
	30	0,467
	45	0,626
4	10	4,348
	20	4,393
	30	4,467

Магнітна і електрична сепарація

	45	4,626
6	10	11,015
	20	11,06
	30	11,134
	45	11,293

Таким образом, благодаря рассчитанным траекториям движения магнитных и немагнитных частиц внутри рабочей зоны сепаратора, установлению оптимального соотношения между магнитной силой и силой тяжести определены: условия классификации материала перед обогащением, оптимальная скорость вращения барабана магнитного сепаратора, границы установки шиберных заслонок для сильномагнитного, магнитного и немагнитного продуктов, что позволит выделить магнетит, раскрытый чистый гранат, гранатсодержащие сrostки и фракцию, не содержащую гранат.

Пат. № 2060829 РФ. Магнитный сепаратор для разделения сыпучих материалов / В.Ф. Бызов, Г.В. Губин, В.С. Харламов, В.И. Мулявко, Ю.А. Витовтов, С.В. Мулявко – Оpubл. 27.05.96. Бюл. №15.

© Мулявко В.И., Олейник Т.А., Кушнирук Н.В., 2006

*Надійшла до редколегії 15.09.2006 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Туркенічем О.М.*

УДК 622.7

Е.Е. ХОРУНЖИЙ

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА МАТЕРИАЛА ОТ СПОСОБА ПОДАЧИ ПРИ СУХОЙ БАРЬЕРНОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Для сухого магнитного обогащения слабомагнитных руд россыпных месторождений разработан барьерный сепаратор без движущихся частей. Он состоит из электромагнитной системы и расположенных между полюсными наконечниками матриц. Матрица – это набор наклонных каналов, в которых происходит разделение обогащаемого материала на магнитный и немагнитный

продукты [1–3].

Для получения исходных данных при разработке сепаратора были выполнены лабораторные исследования барьерной магнитной сепарации. Канал матрицы лабораторного барьерного сепаратора идентичен каналам матрицы промышленного сепаратора. Спроектированный на базе результатов лабораторных исследований, промышленный сепаратор имеет более низкие технологические показатели в сравнении с полученными в лабораторных условиях. Для выяснения причин этого различия были проведены специальные лабораторные исследования.

В лабораторном сепараторе исходный материал по наклонному лотку подается непосредственно в канал матрицы. Ширина лотка равна ширине канала матрицы. Поэтому толщина и высота потока материала,двигающегося в лотке и при входе в канал матрицы, одинаковы. Такая подача материала в дальнейшем будет называться прямой подачей материала (рис. 1 а,в). В промышленном барьерном сепараторе подача материала происходит по всей ширине матрицы, состоящей из нескольких каналов. Поэтому одна часть материала попадает непосредственно в канал, а другая натывается на торцы пластин (рис. 2 а,в). В результате удара эта часть материала подбрасывается, ее скорость уменьшается и только после этого материал входит в матрицу. В дальнейшем такая подача будет именоваться торцевой.

Основным предметом лабораторных исследований явилось различие при входе обогащаемого материала в матрицу барьерного сепаратора в лабораторном и промышленном исполнениях, т. к. при различных способах его подачи кардинально менялось само поведение материала в наклонных лотках непосредственно при входе в матрицу.

Задача проведенных исследований – изучение параметров потока сыпучей гранулированной среды при различных способах подачи его в лоток и влияние условий течения материала в лотке на распределение при входе в канал матрицы сепаратора.

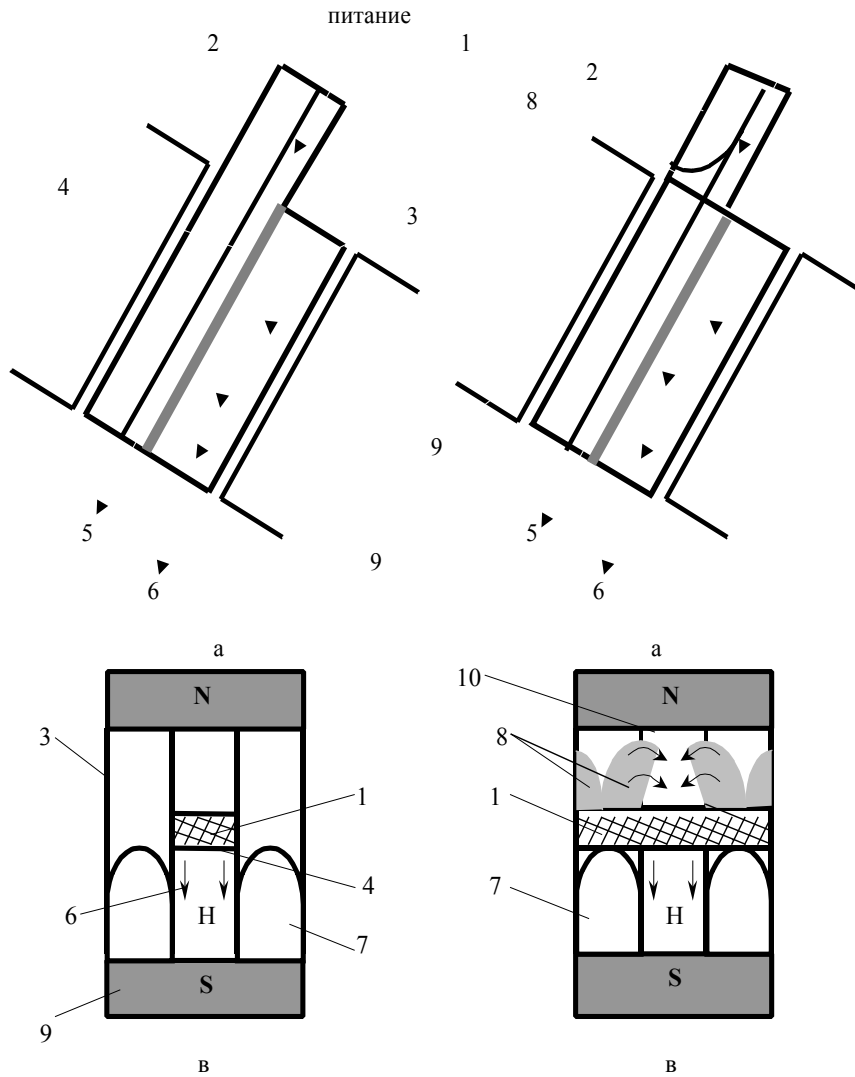


Рис.1. Схема матрицы лабораторного барьерного сепаратора и процесс распределения материала в ней при использовании прямой подачи.

Рис.2. Схема матрицы промышленного барьерного сепаратора и процесс распределения материала в ней при использовании торцевой подачи.

Рис. 1. Схема матрицы лабораторного барьерного сепаратора и процесс распределения материала на ней при использовании прямой подачи:

Рис. 2. Схема матрицы промышленного барьерного сепаратора и процесс распределения материала на ней при использовании торцевой подачи:

1 – материал, подаваемый на обогащение; 2 – наклонный вводной лоток;
3 – матрица сепаратора; 4 – область магнитного барьера; 5 – магнитные зерна;
6 – немагнитные зерна; 7 – ферромагнитные пластины; 8 – часть потока материала, подбрасываемая вследствие торцевого удара; 9 – полюсные наконечники магнитной системы; 10 – потолочина канала матрицы

Каналы в зависимости от способа подачи материала имели неодинаковую

ширину. Следовательно, различными были скорости движения материала у входа в канал матрицы. С учетом этого необходимо было рассмотреть зависимость скорости материала в лотке от удельной производительности его подачи (масса материала на единицу рабочей поверхности лотка в единицу времени).

Механика движения сыпучей среды при проведении лабораторных опытов изучалась с тем же углом наклона лотка, при котором проводились и промышленные испытания барьерного сепаратора, равном 30° к вертикали. Производительность подачи материала в наклонный канал изменялась от 5 до 50 г/с. В основном, опыты проводились при $Q = 17$ г/с, что соответствовало $q = 3$ т/(ч·м) на 1 м фронта подачи питания в промышленном сепараторе.

Для определения толщины слоя движущегося по каналу обогащаемого материала на боковых внутренних стенках каналов по всей их длине были нанесены тонкие линии для измерения высоты, которой достигал материал за время своего течения по лотку при разной производительности подачи и разной длине зоны протекания материала. Каналы имели гладкие внутренние стенки и дно для обеспечения лучшего проскальзывания сыпучей среды [4, 5].

Изначально предполагалось, что обогащаемый материал, движущийся по наклонному лотку, перед входом в канал матрицы сепаратора должен проходить в каждом определенном случае путь разной длины. Поэтому сыпучий гранулированный материал подавался на различном расстоянии от дна лотка, составляющем от 40 до 120 мм при максимальной длине наклонного лотка 120 мм. Конструктивные параметры каналов принимались в зависимости от крупности материала, подвергающегося сухой барьерной магнитной сепарации. Ширина каналов принималась минимально возможной, исключающей засорение крупными зернами; высота канала принималась такой, чтобы можно было обеспечить ввод в канал поток обогащаемого материала с заданной производительностью его подачи [1]. Ширина каналов соответственно составляла 20 и 10 мм при высоте в 15 мм.

Для изучения эффекта различия в движении и распределении материала при двух различных способах подачи поставлена серия опытов, в ходе которых наклонные каналы, соответственно предназначенные для обоих способов подачи, были совмещены вместе. Причем, это было сделано таким образом, чтобы материал сначала, как при торцевой подаче, истекал вниз в широком лотке

(рис. 3 а), а затем его движение происходило по узкому лотку (рис. 3 б). Каналы соединялись боковыми металлическими пластинками (рис. 3 в), имитирующими собой торцы ферромагнитных пластин матрицы промышленного барьерного сепаратора. Вследствие различия геометрических размеров каналов и соударения материала с металлическими пластинками сепаратора наблюдался своеобразный подброс части исходного материала, который коренным образом

изменял движение и распределение этой части сыпучей среды уже непосредственно в канале матрицы сепаратора.

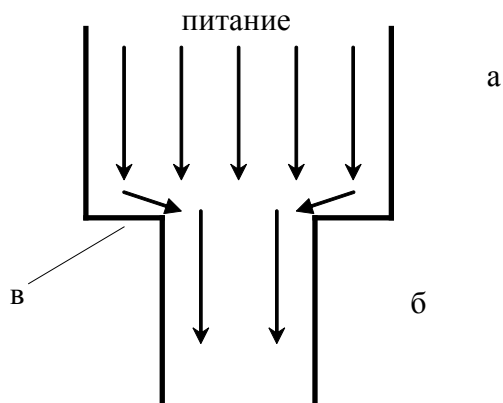


Рис.3. Распределение материала в широком (а)
и узком (б) наклонном лотках

Рис. 3. Распределение материала в широком (а)
и узком (б) наклонных лотках

Подброшенный таким образом к потолочине канала материал содержит большое количество немагнитных частиц. Теперь этим частицам, чтобы проникнуть в немагнитный продукт, необходимо опуститься на слой движущегося в канале материала, а затем пройти сквозь этот слой.

Течение сыпучей среды после столкновения ее с торцами пластин матрицы можно представить как течение материала вокруг препятствия квадратной формы [6].

Рассмотрим движение материала в лотке при оптимальной удельной производительности подачи $Q = 17$ г/с. В табл. 1 приводятся данные лабораторных исследований, в том числе зависимости скорости течения сыпучего гранулированного материала по наклонному лотку и толщины потока в нем от удельной производительности его подачи, графические же данные этой зависимости демонстрирует рис. 4. Как видно из таблицы, в результате незначительного влияния на материал стенок и дна канала в случае торцевой подачи материала скорость его в широком лотке больше при одинаковой удельной производительности подачи.

Таблица 1

Тип подачи материала	Удельная производительность	Скорость течения материала по лотку	Высота потока материала в лотке h_i
----------------------	-----------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------

	подачи материала q , т/(ч·м)	v , м/с	мм
Прямая	1,0	0,036	6
	2,0	0,053	8
	3,0	0,081	9
	5,0	0,107	10
Торцевая	1,0	0,053	4
	2,0	0,071	6
	3,0	0,104	7
	5,0	0,134	8

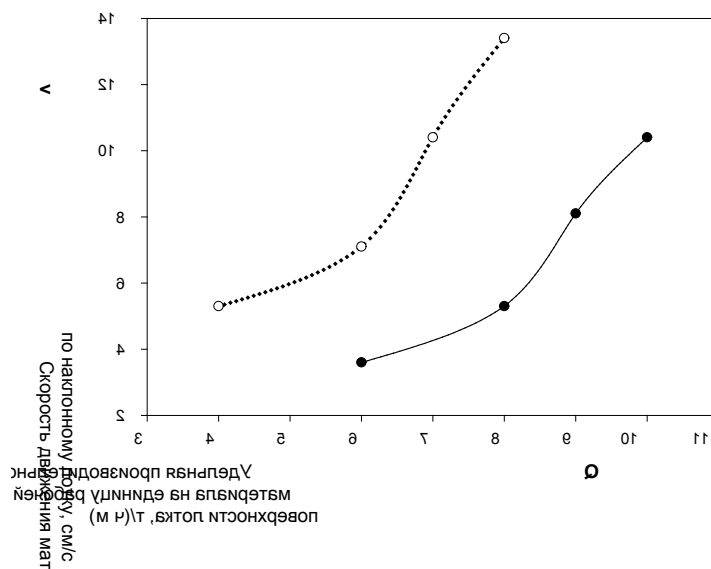


Рис. 4. Зависимости скорости течения сыпучего гранулированного материала по наклонному лотку и толщины потока в нем от удельной производительности его подачи

Очевидно, при торцевой подаче скорость материала в канале наблюдается выше. Но часть общего потока, движущаяся достаточно близко к периферии лотка, после соударения с торцами пластин матрицы сепаратора имеет минимально возможную скорость. Как следствием такого подброса материала – существенное уменьшение скорости общего потока в сравнении с прямой подачей, при которой поток непосредственно из наклонного вводного канала попадает в матрицу, где и происходит разделение на магнитный и немагнитный компоненты.

Рис. 5 схематично демонструє движение и распределение потока материала в поперечном разрезе обоих прямоугольных наклонных каналов.

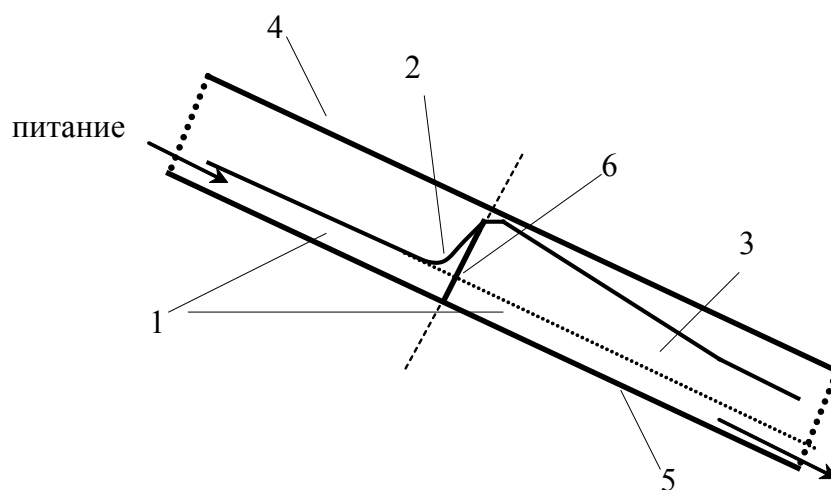


Рис. 5. Распределение материала в матрице барьерного сепаратора при торцевой подаче

Методика проведения опытов такова (рис. 5) исходный материал 1 начинает свое движение по широкому наклонному лотку 4. В момент встречи с металлическими пластинками, представляющими собой в данном случае торцы ферромагнитных пластин матрицы 6, общий поток материала разделяется на два неравнозначных. Первый, практически не изменяя своих основных параметров (скорость, толщина слоя), двигаясь в центральной части широкого канала, непосредственно попадает в узкий канал 5, имитирующий по конструктивным параметрам матрицу. Второй поток материала движется с обеих сторон широкого лотка у его периферии и наталкивается вниз лотка на боковые стенки, следствием чего служит описанный выше подброс этой части материала 2 вверх. Данный подброс заметно замедляет скорость материала, практически снижая ее до нуля. Если принять скорость материала в широком лотке 1 равной v_1 и толщину его слоя за h_1 , то с учетом влияния на поток торцевого удара толщина слоя подброшенного материала, принятая за h_2 , будет больше h_1 , но скорость этого материала будет $v_2 < v_1$. Вследствие разгона материала в узком канале до определенного числового значения она стремится превзойти v_1 . Поскольку центральная часть общего потока материала беспрепятственно истекает из широкого наклонного лотка в узкий, то и толщина слоя этой части материала остается неизменной в нем 1. Здесь же происходит постепенный разгон потока материала, натолкнувшегося на торцы пластин матрицы и подброшенного вверх. По истечении достаточно короткого промежутка времени происходит плавная стабилизация скорости общего потока сыпучей среды в узком канале 3, состоящего уже из двух смешанных потоков

матеріала. В свою череду це приводить до зниження товщини шару, яку приймаємо рівною h_3 . Встановившись швидкість двох сумішних після торцевого удару потоків матеріалу в вузькому лотку, прийнята за v_3 , менше швидкості потоку матеріалу, який ще до удару о торці двигався по широкому лотку. Слідовательно, $v_2 < v_3 < v_1$ і $h_1 < h_3 < h_2$.

Як відомо раніше, в початковий момент руху по нахилному лотку відбувається поступове зростання швидкості сыпучей середовища до того моменту, поки її потік не досягне швидкості встановившогося руху. Разом з збільшенням швидкості зростає і гальмівний вплив від взаємного зіткнення зерен матеріалу і їх тертя про стінки каналу. Це поступово приводить до того, що по мірі наближення потоку частинок до дна каналу відбувається їх гальмування. Процес цей відбувається швидше в вузькому лотку внаслідок впливу розташованих достатньо близько одна до одної стінок самого каналу. Вивчення середньої і максимальної швидкостей потоку рухомого в нахилному лотку матеріалу, більш детально описано в [7–10].

Виявляється, швидкість в будь-якому шарі рухомого в каналі потоку матеріалу збільшується в разі застосування торцевої подачі, і спостерігається це явище абсолютно на будь-якій глибині потоку. Відповідно, в широкому лотку більше значення набуває і максимальна швидкість потоку середовища. Вивчені максимальні швидкості потоку матеріалу склали $v_{\max \text{ пр}} = 0,135 \text{ м/с}$ і $v_{\max \text{ торц}} = 0,173 \text{ м/с}$.

Слідовательно, профіль швидкостей по глибині потоку в подовжньому перерізі в широкому лотку буде більш гострим, ніж в вузькому.

Виявлено, що незалежно від способу подачі матеріалу до моменту досягнення потоком швидкості встановившогося руху товщина його набуває певне числове значення вздовж лотка по всій наступуючій довжині аж до самого дна і в наступному глибина потоку вже не змінюється: він тече з постійною щільністю. Постійність товщини шару матеріалу характерно для кожного визначеного масового витрати, з яким сыпучая середовище подається в нахилний лоток. Очевидно, товщина шару матеріалу в каналі залежить від продуктивності подачі і збільшується при поступовому її збільшенні. Незалежно від відстані вниз по лотку, яку необхідно подолати потоку сыпучей середовища перед потраплянням в зону магнітного поля, і від того, який спосіб подачі вказаної середовища застосовується в кожному конкретному разі, збільшення шару матеріалу в лотку при рівномірному течії і збільшенні довжини зони протікання не відбувається. Сам же метод визначення мінімальної довжини каналу при сухій бар'єрній магнітній сепарації аналітичним шляхом приведений в [1].

Матриця промислового сепаратора була спроектована по результатам лабораторних досліджень. По тому довжина її початково каналу підібрана таким чином, що при прямій подачі матеріалу немагнітні частинки за

время их нахождения в канале успевают выйти из слоя магнитного материала в немагнитный продукт. При торцевой подаче материала с учетом возрастания самого его слоя в канале матрицы время прохождения немагнитных частиц сквозь поток магнитных частиц, взвешенных над областью магнитного барьера, больше времени нахождения этих частиц в канале матрицы. Немагнитные частицы, не успевшие пройти сквозь слой магнитных частиц, поступают вместе с ними в магнитный продукт. Поэтому именно в случае торцевой подачи немагнитным частицам в условиях $h_2 > h_1$ и $h_3 > h_1$ (рис. 5) явно понадобится больший промежуток времени для преодоления ими слоя магнитного материала в матрице.

Данные зависимости скорости потока сыпучей среды в канале матрицы сепаратора от толщины слоя с учетом воздействия на нее торцевого удара показаны в табл. 2. Толщина слоя материала в узком канале (или канале матрицы) при подаче на торцы пластин стабилизируется и устанавливается неизменной на расстоянии около 70 мм.

Длина матрицы барьерного сепаратора составляет $L = 200$ мм, а это значит, что подброшенной вследствие удара части материала будет необходимо преодолеть более $1/3$ ее длины, прежде чем она достигнет слоя материала, движущегося непосредственно над магнитным барьером. Время нахождения подброшенного материала в матрице намного больше того, которое потребуется для материала, поступающего в матрицу при прямой подаче. За более длительное время пребывания частиц в зоне магнитного поля материал, поступивший в магнитный продукт барьерной сепарации при торцевой подаче, не имеет возможности достаточно хорошей очистки от немагнитных частиц. Следовательно, полученный в процессе торцевой подачи магнитный продукт будет содержать большее количество немагнитного (засорения) в сравнении с магнитным продуктом, который получается в результате использования прямой подачи материала.

Таблица 2

Тип подачи материала	Расстояние после удара о торцы пластин l , мм	Скорость материала v_i , м/с	Высота подброса h материала, мм
Торцевая, $Q_{уд}=17$ г/с	0	0,06	12
	10	0,067	11
	20	0,081	9
	30	0,091	8
	50	0,091	8
	70	0,104	7
	100	0,104	7
	120	0,104	7

Проведенные лабораторные эксперименты подтвердили, что достаточно сильное засорение немагнитным продуктом наблюдается именно при торцевой подаче сыпучего материала в канал матрицы. В первую очередь, это происходит из-за явления торцевого удара, приводящего к большому засорению магнитного продукта немагнитным.

На рис. 6 изображена зависимость засорения магнитного продукта барьерной сепарации немагнитным материалом от различной удельной производительности подачи материала и длине зоны его протекания по наклонному вводному каналу. Очевиден тот факт, что увеличение производительности подачи исходного материала влечет за собой повышенное содержание немагнитного материала в магнитном продукте. Такая же тенденция наблюдается с возрастанием длины зоны протекания материала по лотку. Следовательно, длина наклонного вводного канала не должна быть достаточно большой для предотвращения повышенного содержания немагнитного материала в магнитном продукте. Методика определения минимальной длины канала описана более подробно в [1].

Проведенные лабораторные исследования подтверждают теоретическое предположение о том, что в случае использования торцевой подачи материала значительное засорение магнитного продукта барьерной сепарации немагнитными зернами происходит вследствие влияния именно торцевого удара, усиление которого непосредственно связано с повышением производительности подачи материала и длины зоны протекания материала по наклонному вводному лотку.

В табл. 3 показана зависимость содержания немагнитного продукта в магнитном от высоты подброса материала при торцевой подаче и оптимальной производительности подачи материала $Q = 17$ г/с в канал, соответствующей $Q = 3$ т/ч на 1м фронта подачи питания в промышленных условиях, а также от длины зоны протекания материала в наклонном лотке.

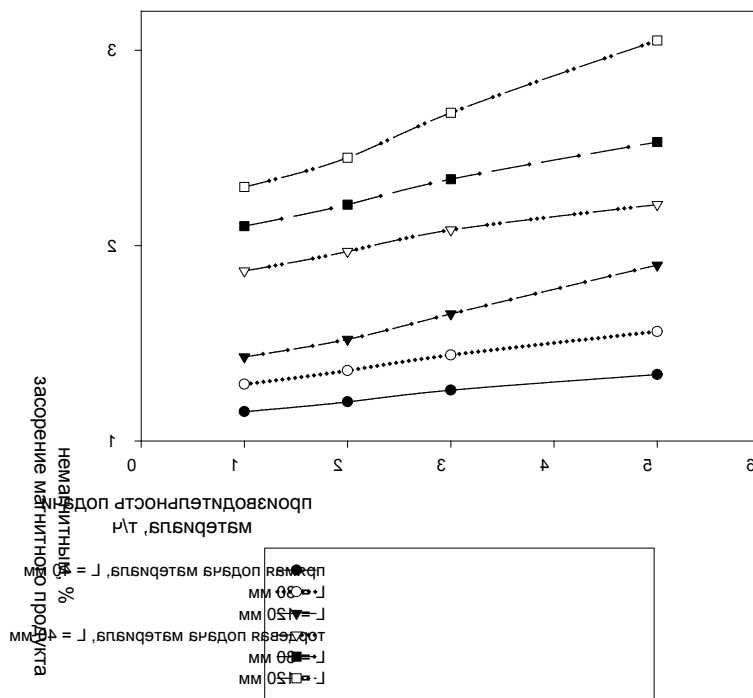


Рис. 6. Зависимость засорения магнитного продукта барьерной сепарации немагнитным материалом

Очевидно, что повышение засорения немагнитным при использовании торцевой подачи материала наблюдается даже при совершенно малой длине зоны протекания материала (40 мм). Таким образом, длина лотка для подачи материала, высота подброса и, как следствие этого, содержание немагнитных частиц в магнитном играют существенную отрицательную роль при использовании данного типа подачи исходного материала при сухой барьерной магнитной сепарации в промышленных условиях.

Таблица 3

Тип подачи материала	Длина зоны протекания материала, мм	Производительность подачи, т/ч	Содержание немагнитного, %	Высота подброса материала, мм
Прямая	40	3,0	1,26	—
	80		1,44	—
	120		1,65	—
Торцевая	40	3,0	2,08	10
	80		2,34	12
	120		2,68	12

Основным заключением всех проведенных исследований барьерного сепаратора может служить то, что в их результате показана абсолютная целесообразность промышленного применения при сухой барьерной магнитной сепарации матриц с прямой подачей материала в канал, т. е. с подачей, при которой исходный материал до входа в матрицу сепаратора не наталкивается на торцы ферромагнитных пластин.

Выводы:

1) При прочих равных условиях (удельная производительность подачи, длина зоны протекания материала по лотку) скорость материала в лотке наблюдается выше в результате применения торцевой подачи материала. Это отрицательно влияет на качество магнитного продукта из-за увеличения содержания немагнитного в нем.

2) Результаты лабораторных исследований показали целесообразность применения при барьерной магнитной сепарации матриц с прямой подачей материала в канал, основным результатом использования которой является меньшее засорение магнитного продукта сепарации.

Список литературы

1. Туркенич А.М., Рудицкий А.В. Барьерная магнитная сепарация зернистых слабомагнитных материалов. – Д.: Национальный горный университет, 2003. – С. 8–24.
2. Turkenich A.M., Baranov U.D., Ruditsky A.V. The barrier magnetic separator for the treatment of weakly magnetic ores: laboratory-scale investigations and industrial tests // Magnetic and Electrical Separation. – 2002. – Vol. 11(4). – P.P. 239–249.
3. Туркенич А.М., Туркенич Р.И. Способ непрерывной магнитной сепарации слабомагнитных материалов и устройство для его осуществления. – Патент Российской Федерации. – № 2209684. – 2003.
4. Гудмен Н., Коун С. Две задачи о гравитационном течении гранулированных материалов // Механика гранулированных сред. – 1985. – № 36. – С. 64–85.
5. Сэвидж С. Гравитационное течение несвязных гранулированных материалов в лотках и каналах // Механика гранулированных сред. – 1985. – № 36. – С. 86–146.
6. Неддерман Р., Дэвис С., Хортон Д. Течение гранулированных материалов вокруг препятствий // Механика гранулированных сред. – 1985. – № 36. – С. 228–241.
7. Кирия Р.В., Богданов В.М. О движении сыпучей среды по наклонному лотку // Наук. вісн. – 2001. – Вип. 3. – С. 47–51.
8. Кирия Р.В. Кинетический подход к выводу уравнений движения сыпучих сред // Наук. вісн. – Сер. Механика. – 1999. – Вип. 2. – С. 143–150.
9. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. – М.: Машиностроение, 1964. – 252 с.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.

© Хорунжий Е.Е., 2006

Надійшла до редколегії 18.10.2006 р.

Магнітна і електрична сепарація

Рекомендовано до публікації д.т.н. Туркенічем О.М.